

考虑缓冲区配置的生产线布局优化设计

黄君政¹, 李爱平¹, 刘雪梅¹, 谢楠²

(1. 同济大学 现代制造技术研究所, 上海 201804; 2. 同济大学 中德工程学院, 上海 201804)

摘要: 将启发式遗传算法和空间填充曲线(SFC)相结合, 以包括在制品(WIP)持有费用、缓冲区配置费用和物料搬运费用的总费用最小化为目标, 对缓冲区配置进行生产线布局优化设计. 通过对某柴油发动机缸体加工生产线实例分析, 验证了设计的有效性和先进性.

关键词: 缓冲区配置; 在制品定额; 生产线布局

中图分类号: TH181

文献标志码: A

Optimal Design of Production Line Layout Considering Buffer Allocation

HUANG Junzheng¹, LI Aiping¹, LIU Xuemei¹, XIE Nan²

(1. Institute of Advanced Manufacturing Technology, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Sino-German College of Applied Sciences, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: With a combination of genetic algorithm and space filling curve (SFC), an optimal design method for production line layout was proposed to minimize the total cost including work in progress (WIP) holding cost, buffer allocation cost and material handling cost in consideration of buffer allocation. A case study of production line for a diesel engine cylinder block was given to verify the availability and advancement of the design.

Key words: buffer allocation; work in progress (WIP) values; production line layout

生产线布局设计属于制造设施规划的重要分支^[1], 设计过程中需要确定制造资源如何布置才能最佳地支持生产, 国内外学者对此做了大量研究^[2-6]. Saraswat^[7]提出了考虑多目标的块状布局, 布局过程综合考虑了物流距离、在制品(WIP)定额和最少搬运设备数量的平衡, 通过对面积约束的处理, 研究部门面积需求对布局的影响敏感度.

Jaramillo^[8]提到了机床布局需要考虑在制品存储空间的需求. 陈行丰等^[9]在车间布局研究中解决了由于工序不平衡产生的在制品占用面积分配需求问题. 实际的串行生产线中, 加工机床具有一定的故障率和修复率, 通过配置缓冲区来存储在制品可以保障生产线正常作业. 缓冲区占用面积除了与产品类型、存放模式等因素有关以外, 主要由在制品定额决定. 很多启发式算法被应用于生产线布局, 设计过程中要求机床布置尽量紧凑, 往往只给定相邻机床一定间隙来避免机床位置重合, 很少考虑缓冲区的实际占用空间. 有些研究者虽然在布局中考虑了在制品定额的计算, 但没有为存储该在制品的缓冲区分配空间.

为了便于问题描述, 本文为每台机床配置一个相应的缓冲区, 将机床及缓冲区作为一个作业单元. 通过将遗传算法和空间填充曲线(SFC)相结合, 在保证在制品定额满足生产线机床可用度约束的情况下, 对不同面积的作业单元进行布局.

1 布局优化数学模型

1.1 二次覆盖问题模型

布局问题依据需要分配的面积作业单元可分为等面积或不等面积两类. 等面积作业单元的布局问题是二次分配问题(QAP), 不等面积作业单元的布局问题是二次覆盖问题(QSCP). 大多数研究者在研究优化布局的二次覆盖问题时, 主要考虑物料搬运因素, 以最小化物料搬运费用作为优化布局的目标, 其目标模型如下:

$$F_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} f_{ij} d_{ij} \quad (1)$$

式中: F_1 为总物料搬运费用; c_{ij} 为作业单元 i 和作业单元 j 之间的单位物料移动每单位距离的搬运费

收稿日期: 2014-03-25

基金项目: 国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2013ZX04012-071)

第一作者: 黄君政(1979—), 女, 博士生, 主要研究方向为制造设施规划. E-mail: hshuangshuang@163.com

通讯作者: 李爱平(1951—), 女, 教授, 博士生导师, 工学博士, 主要研究方向为数字化设计及制造系统等. E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

用; f_{ij} 为作业单元 i 和作业单元 j 之间物料搬运频率; d_{ij} 为作业单元 i 和作业单元 j 质心之间的矩形距离; N 为作业单元数目。

1.2 布局优化总费用模型

生产线系统涉及在制品、缓冲区和机床等多种制造资源, 布局费用应综合考虑相关制造资源因素的影响。针对串行生产线系统, 在研究二次覆盖问题的基础上, 考虑到在制品持有费用、缓冲区配置费用和物料搬运费, 建立了考虑缓冲区配置的生产线

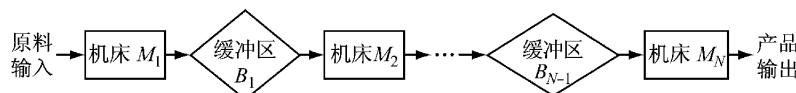


图1 串行生产线

Fig.1 Serial production line

根据周军等^[10]的研究结果可知, 系统处于稳定状态时, 在制品积压量增量的概率分布应为不依赖时间变量的常量, 即 $P(i, b_i) = \left(\frac{\rho_i}{\rho_{i+1}}\right)^{b_i} P(i, 0) = \xi_i^{b_i} P(i, 0)$. 其中, b_i 表示第 i 和第 $(i+1)$ 台机床之间的在制品数量; $P(i, b_i)$ 表示 B_i 中在制品积压量为 b_i 时的概率; ρ_i 和 ρ_{i+1} 分别表示 M_i 和 M_{i+1} 独立使用时的生产率, $\frac{\rho_i}{\rho_{i+1}} = \xi_i$. $P(i, B_i) = \frac{\xi_i^{B_i}(1-\xi_i)}{1-\xi_i^{B_i+1}}$ 为 B_i 已满时的概率, $P(i, 0) = \frac{1-\xi_i}{1-\xi_i^{B_i+1}}$ 为 B_i 已空时的概率, 机床独立使用时的可用度 $e_i = \frac{\mu_i}{\mu_i + \lambda_i}$, 在生产中的实际可用度 $e'_i = e_i \left(1 - \frac{1-\xi_{i-1}}{1-\xi_{i-1}^{B_{i-1}+1}} - \frac{\xi_i^{B_i}(1-\xi_i)}{1-\xi_i^{B_i+1}}\right)$. 由宋士刚等^[11]的研究结果可知: $P(i, B_i)$ 为 B_i 已满时的概率, 即机床阻塞率; $P(i, 0)$ 为 B_i 已空时的概率, 即机床待料率。

1.2.2 总费用目标模型的建立

总费用目标模型的建模过程基于下列假设:

(1) 每台机床和其随后一个缓冲区作为一个作业单元, 且缓冲区面积与在制品定额成正比。

(2) 忽略通道及廊柱等对空间的占用和物流路径的影响, 认为整个布局空间内无障碍。

(3) 分配给每个机床及缓冲区作业单元的区域, 其包围矩形最小宽度大于等于机床的长度。

(4) 认为最后一道工序的机床不会因缓冲区充满而被阻塞。

在制品持有费用和缓冲区配置费用是在制品定额的线性函数, 其费用函数

布局总费用目标函数模型。

1.2.1 串行生产线缓冲区配置模型

假设串行生产线系统模型由 N 台机床和 $(N-1)$ 个缓冲区组成, 如图 1 所示。图 1 中, M_i 表示第 i 台机床, B_i 表示第 i 和第 $(i+1)$ 台机床之间的缓冲区容量(即在制品定额)。每一台机床的加工时间、失效时间和修复时间分别服从均值为 τ_i, λ_i 及 μ_i 的指数分布形式, τ_i, λ_i 及 μ_i 分别表示机床的加工率、故障率和修复率, 且各变量相互独立。

$$F_2 = \sum_{i=1}^{N-1} (C_H + C_B) B_i \quad (2)$$

式中: C_H 为在制品持有费用因子系数; C_B 为缓冲区配置投资因子系数。考虑缓冲区配置的生产线布局总费用目标模型如下所示:

$$\min F = F_1 + F_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N c_{ij} f_{ij} d_{ij} + \sum_{i=1}^{N-1} (C_H + C_B) B_i \quad (3)$$

s. t

$$e_i \left(1 - \frac{1-\xi_{i-1}}{1-\xi_{i-1}^{B_{i-1}+1}} - \frac{\xi_i^{B_i}(1-\xi_i)}{1-\xi_i^{B_i+1}}\right) = e'_i, \quad i=2, \dots, N-1 \quad (4)$$

$$0 \leq P(i, 0) = \frac{1-\xi_i}{1-\xi_i^{B_i+1}} \leq 1, \quad i=1, 2, \dots, N-1 \quad (5)$$

$$0 \leq P(i, B_i) = \frac{\xi_i^{B_i}(1-\xi_i)}{1-\xi_i^{B_i+1}} \leq 1, \quad i=1, 2, \dots, N-1 \quad (6)$$

$$q \geq \frac{D}{T} \quad (7)$$

$$\frac{\xi_i^{B_i}(1-\xi_i)}{1-\xi_i^{B_i+1}} + \frac{1-\xi_i}{1-\xi_i^{B_i+1}} \leq 1 - \frac{q}{e_i \rho_i}, \quad i=1, 2, \dots, N-1 \quad (8)$$

$$aB_i + A_{M_i} \leq A_{C_i}, \quad i=1, 2, \dots, N-1 \quad (9)$$

$$A_{M_N} \leq A_{C_N} \quad (10)$$

$$\frac{A_{C_i}}{2w_i} + \frac{A_{C_j}}{2w_j} \geq d_{ij}, \quad i, j=1, 2, \dots, N \quad (11)$$

式中: q 为生产节拍; D 为生产纲领; T 为生产周期; w_i, w_j 分别为第 i, j 个作业单元的宽度; A_{C_i} 和 A_{C_j} 为作业单元的占用面积; A_{M_i} 为机床的占用面积; a 为单个在制品占用缓冲区面积; A_{M_N} 为第 N 台机床的占用面积; A_{C_N} 为第 N 个作业单元的占用面积。约束式(4)表示满足机床实际可用度平衡方程^[10], 用

于判断在制品定额是否满足生产线机床的实际可用度约束;约束式(5)和(6)表示机床阻塞率和待料率为不大于1的非负数^[11],用于判断该在制品定额是否能保证机床阻塞率和待料率为非负数;约束式(7)表示生产节拍大于等于生产需求率,约束式(8)表示机床实际生产能力满足生产任务需求,通过式(7)和(8)保证该在制品定额使机床具有满足生产任务需求的能力;约束式(9)表示缓冲区的面积与机床的面积之和小于等于机床及缓冲区作业单元分配的面积;约束式(10)表示最后一道工序的机床面积小于等于所分配的作业单元面积;约束式(11)表示两个相邻作业单元位置不会重叠。

2 生产线布局优化设计方法及求解算法

启发式遗传算法(GA)求解问题是从一个初始解集开始搜索,因此具有并行搜索性能,在进化过程中获得的也是一组优化解,从而适于求解多目标优化问题^[12]。通过将遗传算法与空间填充曲线(SFC)^[13]相结合,在每一次遗传操作后,对每个染色体的布局方案应用空间填充曲线进行扫描,划分出机床及缓冲区作业单元形状,此时缓冲区面积被重新分配。在保证满足机床实际可用度的情况下,不断对缓冲区配置进行优选,相比已有的研究,具有优化缓冲区配置并最小化布局总费用的优点。

2.1 基于空间填充曲线的优化设计方法

空间填充曲线具有多种类型,本文选择

Hilbert 曲线,如图2所示。曲线连接每一个网格,沿着曲线移动的任意一个点总可以访问与当前网格相邻的网格,且每个网格恰好只访问一次^[6]。假设八个部门(图1中1~8)的面积值如下:12,8,6,6,8,4,6,14,如果八个部门的填充顺序为1—2—3—4—5—6—7—8,那么从网格1开始沿着空间填充曲线先给第1个部门12个格子,再沿曲线给第2个部门8个格子,以此类推,最后得到布局图,如图2a所示。要交换部门4和6,可以再沿着空间填充曲线重新分配网格得到布局图,如图2b所示。

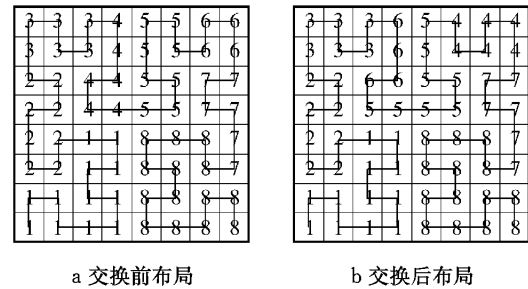


图2 Hilbert 曲线

Fig.2 Hilbert curve

本文构建了考虑缓冲区配置的生产线布局优化设计框架,如图3所示。应用遗传算子对具有降低总费用趋势的染色体进行遗传操作,并选择总费用最小的生产线布局方案,得到优化后的在制品定额、缓冲区配置和作业单元布置,从而实现生产线布局优化设计。

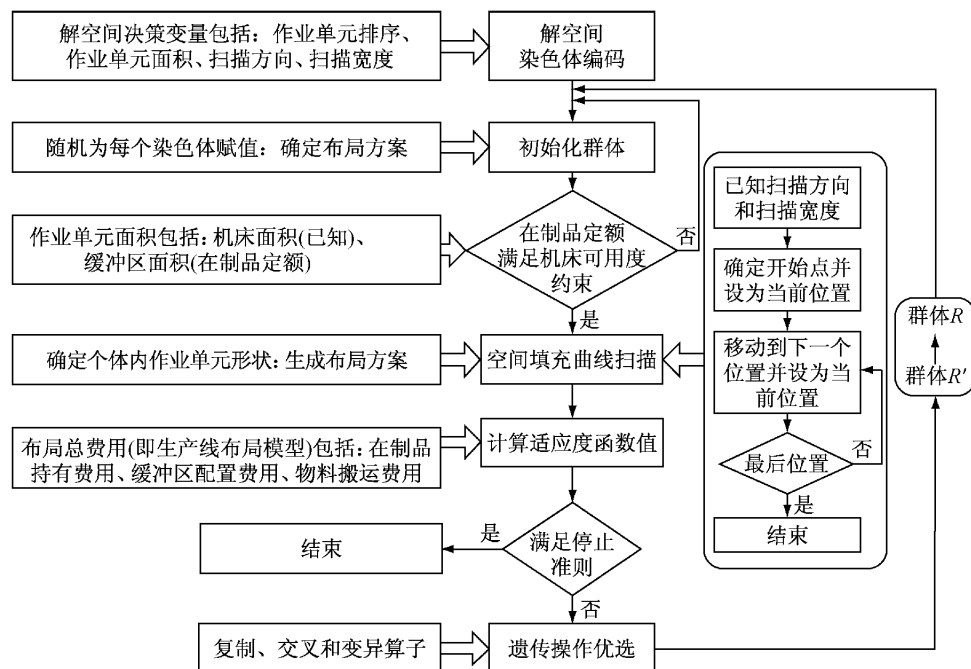


图3 考虑缓冲区配置的生产线布局优化设计框架

Fig.3 Optimal design frame of production line layout considering buffer allocation

2.2 求解算法的具体过程

找到合适的表达方法使编码与所求解对应,是实现算法的关键.下文详述生产线布局优化设计求解的具体过程:

2.2.1 染色体编码及染色体初始化

应用解空间编码的方法对决策变量进行编码,染色体采用十进制实数值表达,表达式为 $((X_1, X_2, \dots, X_N), (A_{C_1}, A_{C_2}, \dots, A_{C_N}), O, K)$. 其中, (X_1, X_2, \dots, X_N) 为机床及缓冲区作业单元排列顺序; $(A_{C_1}, A_{C_2}, \dots, A_{C_N})$ 为机床及缓冲区作业单元面积; O 为空间填充曲线扫描方向(见图4); K 为扫描宽度,扫描宽度不能小于机床的宽度. 编码方案示例如表1所示,机床及缓冲区作业单元的排序为1—2—3—4—5—6—7—8,作业单元对应的面积为12,8,6,6,8,4,6,14,采用纵向扫描,扫描宽度为2. 随机生成 m 个个体作为初始种群 R_0 ,并对种群随机赋值实现染色体初始化,得到每个个体的布局方案.

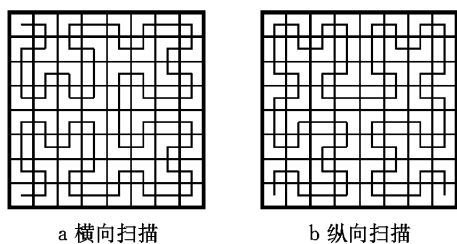


图4 扫描方向

Fig.4 Scanning direction

表1 生产线布局编码方案示例

作业单元序号	作业单元面积	扫描方向	扫描宽度
1	12	纵向	2
2	8		
3	6		
4	6		
5	8		
6	4		
7	6		
8	14		

2.2.2 可用度约束的评定

作业单元面积为机床及其随后的缓冲区面积之和,缓冲区的面积与缓冲区容量(即在制品定额)成线性正比. 已知机床的生产率、故障率和修复率,应用机床实际可用度模型,如约束式(4)所示,判断该在制品定额是否能保证机床实际可用度在允许的取值范围内. 如果在制品定额保证机床实际可用度在取值范围内,认为该在制品定额即为缓冲区容量,从而确定缓冲区配置及缓冲区面积,并且保证满足其他相关约束,则此布局方案有效,满足约束的个体将被选中.

2.2.3 空间填充曲线构建生产线布局

对满足机床实际可用度约束的布局方案,应用第2.1节所示的方法,通过空间填充曲线对作业区域进行扫描,并分配机床及缓冲区作业单元形状,得到机床及缓冲区的面积和位置,从而构建出个体方案的实际生产线布局.

2.2.4 适应度函数

适应度函数用于评估个体性能并指导搜索,选取标准要求规范性、合理性和通用性. 基于作业单元质心间的矩形距离计算物料搬运费用,并计算总费用目标值,如式(3)所示. 根据布局优化目标,以总费用模型的倒数作为适应度函数,计算群体 R 中各个体的适应度值,适应度函数确定如下:

$$l(R) = \frac{1}{F} = \frac{1}{F_1 + F_2}$$

2.2.5 染色体遗传操作

(1) 选择运算

使用比例选择算子确定各个体被选择的概率. 设个体 k 的适应度为 l_k ,则个体 k 被选择的概率 $P_k = l_k / \sum_{k=1}^m l_k$. 当个体的选择概率给定后,产生 $[0, 1]$ 之间的均匀随机数来决定参加交配个体. 若个体选择概率大,则会被多次选中,否则被淘汰.

(2) 交叉运算

使用单点交叉算子,任意挑选经过选择操作后种群中的两个个体作为交叉对象,随机产生一个交叉点位置,然后两个个体在交叉点位置互换部分基因码,形成两个子个体. 若交叉率为 P_c ,则有 mP_c 个染色体随机被选择进行交叉运算.

(3) 变异运算

对作业单元排列顺序和作业单元面积各段内进行换位变异操作,同时对空间填充曲线扫描方向和扫描宽度各段内进行均匀变异操作. 若变异率为 P_m ,共 g 个基因位,则有 gmP_m 个基因位被选取进行变异操作.

通过遗传操作生成新的群体 R' ,再次作为初始群体进行以上布局优化设计的求解过程,以遗传代数作为迭代终止准则.

3 算法性能测试

对于已有的布局方法,缓冲区由经验直接给定,在生产线布局过程中保持不变,在制品持有费用和缓冲区配置费用不变,总费用的变化仅由物料搬运费用变化决定. 采用文献[5, 14-15]中实际案例进行

比较和分析,其问题规模 $G=10, 20, 30$. 为了验证本文模型和算法的有效性,通过考虑缓冲区变化和缓冲区不变两种布局方法,分别应用标准模拟退火(SA)算法和启发式遗传算法进行求解,其中模拟退火算法的伪代码实现如下:

```

Procedure SA;
Begin
  Initialize population; random  $R = ((X_1, X_2, \dots, X_N), (A_{C_1}, A_{C_2}, \dots, A_{C_N}), O, K)$  (随机产生初始解);
  Set  $T_o, T_e, \alpha, I$  (设置初始温度  $T_o$ 、终止温度  $T_e$ 、衰减因子  $\alpha$ 、Markob 链长  $I$ );
   $T = T_o, i = 1$  ( $i$  为内循环指针);
  While ( $T \leq T_e$ ) do;
    While ( $i \leq I$ ) do;
      For  $R'$  generate SFC and allocate unit area (对于新解  $R'$ , 生成 SFC 曲线并分配作业单元区域);
       $\Delta l = l(R) - l(R')$  (计算目标函数差);
      If  $\Delta l > 0$  (如果目标函数差大于 0)
        Then  $R := R'$  (选择新解)
      End do;
       $R' = \text{update}(R)$  (更新初始解);
    End do;
     $T = \alpha \cdot T$  (更新温度);
     $i = i + 1$  (更新内循环指针);
  End do;
End
    
```

对模拟退火算法和遗传算法分别进行初始参数设置. 模拟退火算法的参数设置为:初始温度 $T_o = 20\ 000\ ^\circ\text{C}$, 终止温度 $T_e = 0.5\ ^\circ\text{C}$, 衰减因子 $\alpha = 0.9$, Markob 链长 $I = 150$, 终止条件为温度改变 200 次. 遗传算法的参数设置为:交叉率 $P_c = 0.6$, 变异率 $P_m = 0.2$, 迭代次数为 300 次, 随机给定满足约束的初始解. 运用前文所述模拟退火算法和遗传算法的求解步骤,应用 Matlab7.0 软件编程实现相关算法,给出了得到最小总费用的运算时间和目标值,如表 2 所示.

表 2 运算时间及最小目标值

Tab.2 Operating time and minimum objective				
G	GA 算法(缓冲区变化)		SA 算法(缓冲区变化)	
	时间/min	目标值/元	时间/min	目标值/元
10	13.96	4 502	10.20	4 598
20	40.10	2 531	34.56	2 602
30	122.30	5 508	156.22	5 412
G	GA 算法(缓冲区不变)		SA 算法(缓冲区不变)	
	时间/min	目标值/元	时间/min	目标值/元
10	2.80	5 010	1.40	5 096
20	6.34	3 016	5.78	3 066
30	38.26	6 014	42.3	6 011

在考虑缓冲区变化的情况下,问题规模 G 为 10 和 20 时,GA 算法相比 SA 算法运算时间较长,但得到了最小目标值;当问题规模 G 为 30 时,SA 算法比

GA 算法的运算时间加长,但最优目标值具有微弱的优势. 考虑到不同缓冲区配置会得到不同机床实际可用度,给出了不同问题规模下,机床平均实际可用度与最小目标值的关系曲线,分别如图 5~7 所示. 机床平均实际可用度较低的情况下,对应的缓冲区容量较大,生产线布局设计的总费用会增加. 机床平均实际可用度增大到一定程度时,对应的缓冲区容量接近无限大,设计方法无法给出可行解. 通过计算

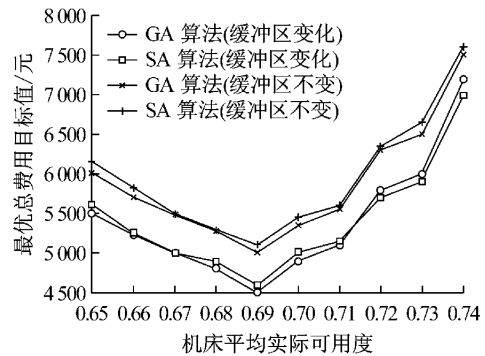


图 5 10 台机床布局总费用目标值

Fig.5 Objective value of total layout cost for 10-machine

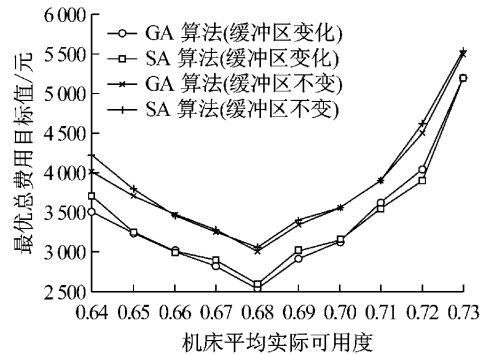


图 6 20 台机床布局总费用目标值

Fig.6 Objective value of total layout cost for 20-machine

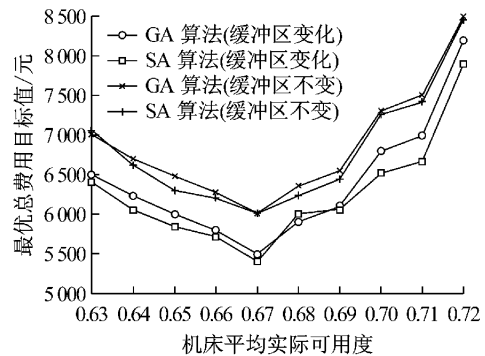


图 7 30 台机床布局总费用目标值

Fig.7 Objective value of total layout cost for 30-machine

A1	A1	A1	A1	A8	A8	A8	A8	A3	A3	A3	A3
A1	A1	A1	A1	A8	A8	A8	A8	A3	A3	A3	A3
A5	A5	A5	A5	A8	A8	A8	A8	A3	A3	A3	A3
A6	A6	A6	A6	A9	A9	A9	A9	A4	A4	A4	A4
A7	A7	A7	A7	A9	A9	A9	A9	A4	A4	A4	A4
A7	A7	A7	A7	A2	A2	A2	A2	A4	A4	A4	A4
A7	A7	A7	A7	A2	A2	A2	A2	A10	A10	A10	A10

图9 考虑缓冲区配置的生产线最优布局
Fig.9 Optimal layout of production line considering buffer allocation

机床正常工作情况下有较大在制品储备;M8 的故障率与 M7 相同,但修复率较高,则为 M8 分配的缓冲区容量相对较低;M4 和 M3 的故障率偏低,为其分配的缓冲区容量也较低;其他机床的缓冲区配置情况也遵循此规则,充分验证了考虑缓冲区配置布局优化设计的有效性。模拟退火算法收敛速度较快,得到最优布局总费用为34 000元,启发式遗传算法虽然收敛速度较慢,但由遗传算法计算得到最小总费用为 30 400 元,在最优布局总费用方面相比模拟退火算法降低幅度达到10.6%,具有一定的先进性。

5 结语

本文考虑了实际生产线中机床故障率对缓冲区的影响,在保证在制品定额满足机床实际可用度约束的前提下,在遗传操作优化过程中,对每个染色体对应的作业单元区域通过空间填充曲线重新分配,同时对缓冲区配置进行优选,并行解决在制品定额、缓冲区配置和机床及缓冲区作业单元布置问题,并选择具有较好费用优势的布局方案。针对不同问题规模的案例,考虑缓冲区变化和缓冲区不变两种布局方法,通过遗传算法和模拟退火算法分别求解,并对计算结果进行了分析和比较。通过实例可知,机床故障率较高,修复率较低,机床实际可用度要求偏高的情况下,配置的缓冲区容量较大;机床故障率较低,修复率较高,机床可用度要求偏低的情况下,配置的缓冲区容量较小。该设计过程得到的缓冲区配置及生产线布局结果与实际情况相符,对解决布局设计问题具有较好的参考价值。

参考文献:

[1] Tompkins J A, White J A, Bozer Y A, *et al.* Facilities planning [M]. Danvers, MA: John Wiley & Sons, 2003.
[2] Aiello G, Scalia L G, Enea M. A multi objective genetic algorithm for the facility layout problem based upon slicing

structure encoding [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 10352.
[3] Garcia Hernandez L, Pierreval H, Salas Morera L, *et al.* Handling qualitative aspects in unequal area facility layout problem: an interactive genetic algorithm [J]. Applied Soft Computing, 2013, 13: 1718.
[4] Ripon K S N, Glette K, Khan K N, *et al.* Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2013, 8: 1.
[5] Yang T, Peters B A, Tu M. Layout design for flexible manufacturing systems considering single-loop directional flow patterns [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164(2): 440.
[6] Wang M J, Hu M H, Ku M H. A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm [J]. Computers in Industry, 2005, 56(2): 207.
[7] Saraswat A. Multi objective design for block layouts [D]. Halifax, NS: Dalhousie University, 2006.
[8] Jaramillo J R. The generalized machine layout problem [D]. Morgantown, WV: West Virginia University, 2007.
[9] 陈行丰,鲁建厦,李英德,等. 离散型制造企业车间布局缓冲区面积设置仿真决策研究[J]. 浙江工业大学学报,2010,38(3): 246.
CHEN Xingfeng, LU Jiansha, LI Yingde, *et al.* Simulation decision-making study of buffer area allocation in workshop layout of a discrete manufacturing enterprise [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(3): 246.
[10] 周军,刘战强. 机床可用度与缓冲区容量的关系模型研究[J]. 工具技术,2006, 40(9): 24.
ZHOU Jun, LIU Zhanqiang. Relationship between machine utilization and buffer capacity [J]. Tool Engineering, 2006, 40 (9): 24.
[11] 宋士刚,李爱平,徐立云. 可重组制造系统缓冲区容量的优化研究[J]. 计算机集成制造系统,2008,14(10):1951.
SONG Shigang, LI Aiping, XU Liyun. Buffer capacity optimization in reconfigurable manufacturing system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10): 1951.
[12] 玄光男,程瑞伟. 遗传算法与工程优化[M]. 北京:清华大学出版社,2003.
XUAN Guangnan, CHENG Ruiwei. Genetic algorithms and engineering optimization [M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2003.
[13] Hsieh Y C, You P S. A new space-filling curve based method for the traveling salesman problems [J]. Applied Mathematics & Information Sciences, 2012, 6(2): 371.
[14] 汪一第,米智伟. SLP 和遗传算法结合在车间设备布局中的应用[J]. 计算机工程与应用,2010,46(5): 211.
WANG Yiqiong, MI Zhiwei. Method of systematic layout planning improved by genetic algorithm and its application in facility layout [J]. Computer Engineering and Applications, 2010, 46(5): 211.
[15] Liu Q, Meller R D. A sequence-pair representation and MIP-model-based heuristic for the facility layout problem with rectangular departments [J]. IIE Transactions, 2007, 39: 377.